

## **Indoor Vertical Farming: konsequente Weiterentwicklung des geschützten Anbaus**

Sabine Wittmann, Ivonne Jüttner, Marvin Spence, Heike Mempel

### **Kurzfassung**

Der Klimawandel und die zunehmende weltweite Urbanisierung treiben den Ausbau von geschützten Produktionssystemen an. Allerdings bleibt die Abhängigkeit gegenüber äußeren Witterungsbedingungen bestehen. Indoor Vertical Farming hingegen verfolgt die vollständige Unabhängigkeit von äußeren Bedingungen, mit dem Ziel einer hochgenauen Steuerung aller Kulturparameter. Gerade bezogen auf den voranschreitenden Klimawandel und die Notwendigkeit zur ressourcenschonenden Produktion ergeben sich deutliche Vorteile durch die ganzjährige, vom Standort unabhängige Produktion von Pflanzen und Rohstoffen. Die Komplexität in der optimalen Vernetzung der Systeme Pflanze-Technik bietet intensive Entwicklungsmöglichkeiten für Digitalisierung und interdisziplinäre Zusammenarbeit.

### **Schlüsselwörter**

Indoor Vertical Farming, Produktionssystem, ASC for Smart Indoor Farming, intensiver Pflanzenbau

## **Indoor-Vertical Farming: Consistent further development of protected cultivation**

Sabine Wittmann, Ivonne Jüttner, Marvin Spence, Heike Mempel

### **Abstract**

Climate change and increasing global urbanization accelerate the expansion of protected cultivation systems. However, certain dependences to external weather conditions remain even in modern greenhouses. Indoor vertical farming, on the other hand, pursues complete independence from external weather conditions with the aim for highly accurate control of all crop parameters. Particularly with regard to the advancing climate change and the need for sustainable resource consumption, there are clear advantages due to the year-round and independent cultivation of plants and raw materials under optimal conditions. The complexity in the optimal networking of the plant-technology systems offers intensive development opportunities for digitization and interdisciplinary collaboration.

### **Keywords**

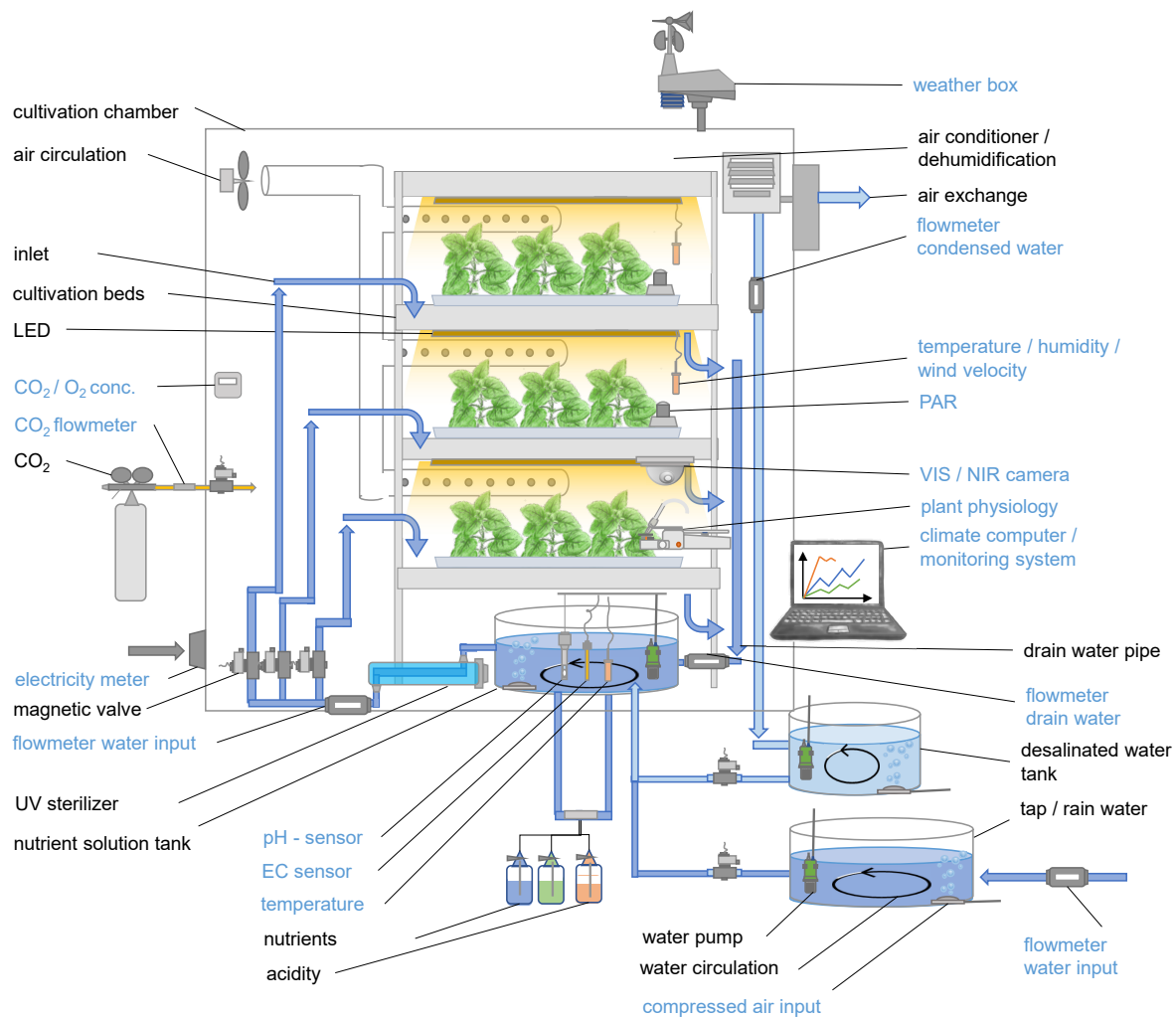
Indoor Vertical Farming, production system, ASC for Smart Indoor Farming, intensive crop production

## Indoor Vertical Farming - High Tech Gartenbau mit steigendem Potential

Geschützte Produktionssysteme aus Folien- oder Glasstrukturen werden seit langem zur Erhöhung der Produktivität und Effizienz im Pflanzenbau genutzt. Der Grad an Technisierung reicht dabei von einfachen Schutzabdeckungen über Bewässerungssteuerungen in foliengeschützten Bodenkulturen bis hin zur Vollautomatisierung ganzer Prozesse in hochmodernen Gewächshäusern. Die Gemeinsamkeit dieser Systeme liegt in der Nutzung transparenter Materialien, mit dem Ziel, die Pflanzen vor Witterungseinflüssen weitgehend zu schützen und gleichzeitig die Globalstrahlung als Hauptenergiequelle für Licht und Wärme zu optimieren. Obwohl mit der Intensivierung im geschützten Anbau die Kontrolle und Optimierung der Kulturbedingungen stetig zunimmt, bleibt eine Abhängigkeit gegenüber den Witterungs- und Klimabedingungen und insbesondere dem Einfluss und der Verfügbarkeit der Globalstrahlung bestehen. Daher kommen zur quantitativen und qualitativen Optimierung der Kultur in Jahreszeiten mit geringerer Verfügbarkeit an Globalstrahlung vor allem in den letzten Jahren zunehmend Zusatzbelichtungssysteme zum Einsatz.

Die Pflanzenproduktion in einer Indoor Vertical Farm – oder auch Plant Factory, wie sie in Asien bezeichnet wird – verfolgt hingegen einen anderen Ansatz. Hier steht die vollständige Unabhängigkeit von der Außenwitterung mit dem Ziel einer hochgenauen Steuerung aller Kulturparameter für ganzjährig homogene Produktqualitäten im Vordergrund. Als Kulturraum werden häufig (Lager-) Hallen oder Container-Strukturen verwendet, welche durch vertikal übereinander angeordnete Ebenen die verfügbare Kulturfläche multiplizieren und die Produktionseffizienz pro eingesetzter Grundfläche deutlich steigern. Als Energiequelle für den pflanzlichen Biomasseaufbau werden nahezu ausschließlich künstliche LED-Belichtungssysteme eingesetzt. Vergleichbar zu modernen Gewächshäusern erfolgt die Bewässerung in geschlossenen hydroponischen nutrient film technology (NFT)- / Deep Water oder aeroponischen Nährlösungssystemen. Durch die konsequente Rückführung des kondensierten Wassers aus Transpiration und Evaporation kann gegenüber vergleichbaren Systemen im Gewächshaus der Bewässerungskreislauf weitgehend verlustfrei gestaltet und dadurch eine deutlich höhere Wassernutzungseffizienz erreicht werden. Der intensive Einsatz von Sensorik dokumentiert und regelt kontinuierlich die Wachstumsbedingungen, sodass ganzjährig eine sehr präzise und homogene Klimaführung erreicht wird.

Die Hauptkomponenten einer Indoor Farm sind demnach die geschlossene Struktur der isolierten Hülle sowie die möglichst effizient platzierten Kulturflächen. Neben einigen zylindrischen und/oder rotierenden Sonderbauformen kommen meist vertikal angeordnete Regalsysteme zum Einsatz, wie sie im nachfolgenden Überblick dargestellt sind und welche sich an der Indoor Farm am Standort der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf orientieren (**Bild 1**). Die Kulturflächen sind jeweils mit LED-Modulen ausgestattet, welche die Fläche homogen ausleuchten und in ihrer spektralen Zusammensetzung, Intensität und Belichtungsdauer angepasst werden können. Wichtiger Bestandteil ist das geschlossene Bewässerungssystem mit integrierter Luftentfeuchtung. Die Klimaführung erfolgt über Klimageräte, einem geringen Luftaustausch mit der externen Umgebung und einem Luftverteilungssystem. Sensoren liefern Daten zum Klima, der atmosphärischen Zusammensetzung, der Nährlösung, der Pflanzenphysiologie und dem Ressourcenverbrauch.

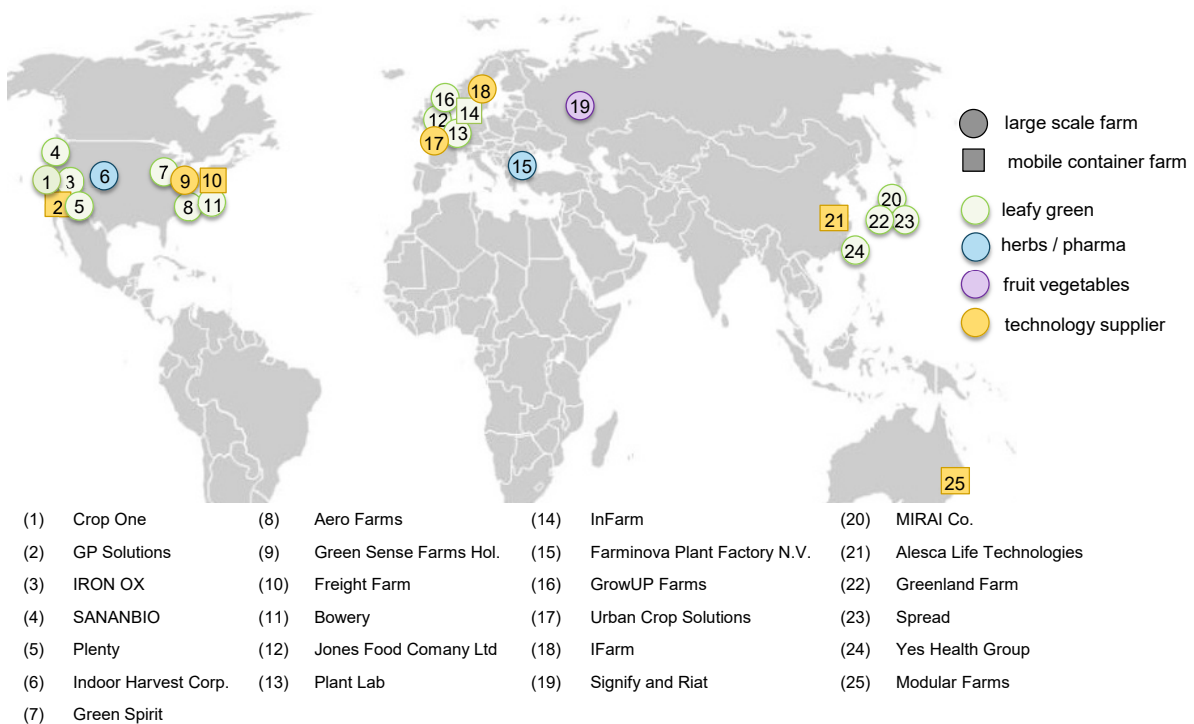


**Bild 1:** Aufbau und Bestandteile einer Indoor Farm (schwarze Schrift = Struktur / Bauteil; blaue Schrift = Sensorik)

**Figure 1:** Structure and components of an indoor farm (black labeling = structural components; blue labeling = sensor system)

Indoor Vertical Farming nimmt seit Jahren eine Position als Trendthema ein, welches im steigenden medialen Interesse, aber auch den zunehmenden Investitionen namhafter Firmen wie Bayer [1], Miele [2], IKEA [3] oder dem LEH [4] verdeutlicht wird. Zudem entstehen beispielsweise in Abu Dhabi [5] oder Dänemark [6] Großprojekte im Bereich Indoor Farming. Generell differenzieren sich die Betriebe dabei vor allem in große, stationäre Farmen (z.B. SPREAD, Japan) und kleinere mobile Einheiten (z.B. InFarm, Deutschland), die unterschiedliche Konzepte, Produkte und Märkte ansprechen (**Bild 2**). Neben der wachsenden Anzahl an Produzenten und dem Angebot schlüsselfertiger Indoor Farming Systeme, ist ein Anstieg der Zulieferer für diesen Markt zu beobachten. Unternehmen aus dem Züchtungsbereich, der Beleuchtungs- und Automatisierungstechnik oder auch der Logistik sehen in dem expandierenden Markt ein Potenzial, neue Geschäftsfelder zu erschließen und ihre Produktpalette bzw. Dienstleistungen zu erweitern [1]. In der Folge wird ein starker Anstieg des weltweiten Marktvolumens im Bereich des Indoor Vertical Farmings auf 6,4 Milliarden US-\$ bis 2023 erwartet, was

gegenüber 2020 dem 2,9-fachen entspricht [7]. Bis 2025 wird bereits ein Marktvolumen von bis zu 15,7 Milliarden US-\$ erwartet [8].

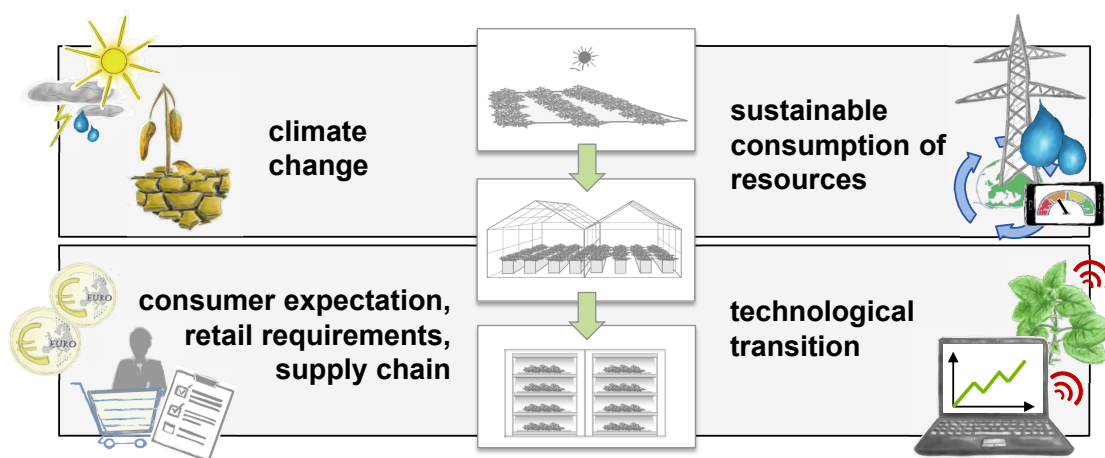


**Bild 2:** Beispiele einiger der größten Indoor Farming Konzepte weltweit

**Figure 2:** Examples of the biggest Indoor Farming concepts worldwide

## Die Herausforderungen der Lebensmittelproduktion – starke Treiber für Veränderungen

Die Globale Lebensmittelproduktion sieht sich unterschiedlichen Herausforderungen gegenüber (**Bild 3**).



**Bild 3:** Herausforderungen der Lebensmittelproduktion agieren als starke Treiber für Veränderungen

**Figure 3:** Challenges for food production who act as strong inducements for change

### *Klimawandel*

Die Gefährdung der globalen Ernährungssicherheit durch den Klimawandel wird in der wissenschaftlichen Literatur seit Jahren als eine der wichtigsten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts bezeichnet [9; 10]. Die veröffentlichte Anzahl wissenschaftlicher Studien pro Jahr mit dem Schwerpunkt auf Klimawandel und Pflanzenbau hat sich beispielsweise seit 1990 um 400 % erhöht [11]. Die pflanzenbauliche Produktion wird auch in Regionen mit hohen Erträgen und modernen Gewächshaussystemen quantitativ und qualitativ stark von der Klimavariabilität/Klimavolatilität beeinflusst [12]. Herausforderungen im Pflanzenbau werden durch steigende/veränderte Temperaturen [13 bis 17], fehlende Wasserverfügbarkeit [18; 16; 19; 20] sowie vermehrt auftretende Unwetter und Starkregenereignisse [21] erwartet. Obwohl die vorliegenden Studien und Modelle regional unterschiedlich ausfallen und hohen Unsicherheiten unterliegen, werden in einigen Regionen wie z. B. Südeuropa mit hoher Wahrscheinlichkeit weitreichende negative Auswirkungen erwartet [22]. Zudem steigt das Risiko, dass durch den Klimawandel aufgrund zunehmender Bodendegradation die landwirtschaftliche Nutzfläche vor allem in Gebieten ohne zusätzliche Bewässerung weiter zurückgeht [23 bis 25]. Auch werden im Rahmen des Klimawandels neben der Produktivität erhebliche Auswirkungen auf weitere Dimensionen der Lebensmittelsicherheit wie Verfügbarkeit, Zugang, Nutzung und Stabilität erwartet [26; 27; 12]. Als Anpassungsstrategien werden häufig Intensivierung des Anbaus, ökologischer Anbau aber auch hochtechnologische industrielle Ansätze aufgeführt [28].

### *Nachhaltiger Ressourcenverbrauch*

Die zunehmende Wichtigkeit, ressourcenschonende und nachhaltige Systeme in der Nahrungsmittelproduktion zu etablieren, wird vielfältig angeführt. Wasser wird dabei als einer der wichtigsten limitierenden Faktoren für den Pflanzenbau in vielen Regionen der Welt erachtet [29; 30]. Es wird erwartet, dass bis 2080 der weltweite Wasserverbrauch zur pflanzenbaulichen Bewässerung trotz des Einsatzes von effizienteren Bewässerungssystemen um weitere 25 % ansteigt [31]. Insbesondere in Gebieten mit geringen Niederschlägen und Bodenwasser sind Maßnahmen notwendig, um die Wassereffizienz zu erhöhen und den Wasserverlust zu minimieren [32]. Der Anbau in Gewächshäusern erreicht sowohl durch die Nutzung von Tropfbewässerung und durch hydroponische Bewässerungssysteme eine deutlich höhere Wassernutzungseffizienz als die Freilandproduktion. Dennoch wird durch den hohen Wasserverbrauch von Gartenbau und Landwirtschaft in Regionen oder Jahreszeiten mit geringem Niederschlag ein steigender Wettbewerb um das verfügbare Wasser erwartet [20]. Weiterhin werden der Nährstoffverbrauch sowie das damit verbundene Thema der Grundwasserbelastung, der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, sowie der Verlust an Biodiversität durch die Umwandlung natürlicher Ökosysteme in landwirtschaftliche Nutzfläche als Herausforderungen für die Landwirtschaft im Bereich der Nachhaltigkeit aufgeführt [33; 34]. Neben den Umweltaspekten führt ein effizienterer Umgang mit Ressourcen zur Reduktion von Kosten. In der Folge steigt die Zahl an Unternehmen mit einem Fokus auf ressourcenschonender Produktion erheblich an. Der Klimawandel treibt dabei den weiteren Ausbau von geschützten Produktionssystemen wie Folien- und Gewächshäusern weltweit an [17; 35]. Allerdings bleibt die Abhängigkeit gegenüber äußeren Witterungsbedingungen, insbesondere der Globalstrahlung, bestehen. Der

Trend zu witterungsunabhängigen Kultursystemen wie Indoor Farming gewinnt in dem Zusammenhang zunehmende Bedeutung [17].

### *Bevölkerungszuwachs, steigende Anforderungen, Supply Chains*

Die wachsende Weltbevölkerung wird den Nahrungsmittelbedarf deutlich steigern [11]. Laut Angaben der FAO wird die Weltbevölkerung bis 2050 auf etwa 11 Milliarden Menschen ansteigen [36]. Der Hauptzuwachs wird dabei vor allem in Entwicklungsländern wie Afrika erwartet. Bis 2050 wird zudem prognostiziert, dass 2/3 der Bevölkerung in urbanen Strukturen lebt [37]. Durch den erwarteten Anstieg an Megastädten wird sich die täglich notwendige Importmenge an Nahrungsmitteln in urbane Regionen, welche teilweise über weite Strecken und mehrere Kontinente transportiert wird, erheblich erhöhen [38]. Die Supply Chains für Agrar- sowie Frucht- und Gemüseprodukte sind gekennzeichnet durch komplexe Produzenten-Netzwerke, die mit großen international agierenden Unternehmen im Handel zusammenarbeiten. Globale und teilweise komplexe Supply Chain-Netzwerke können zudem die Lebensmittelsicherheit sowie die Zuverlässigkeit der Versorgung beeinträchtigen, wie auch die aktuelle Corona-Situation eindringlich aufzeigt [39; 40]. Produzenten müssen sich zudem zunehmend steigenden Anforderungen durch die Konsumenten, den Lebensmitteleinzelhandel, der abnehmenden Industrie und der Politik stellen. Je nach Absatzmarkt werden zudem unterschiedlichste Anforderungen an Label oder Umweltzeichen, die Reduktion von Lebensmittelverlusten oder auch besondere gesundheitsfördernde Aspekte gestellt. Weiterhin haben pflanzliche Rohstoffe neben der Nahrungsmittelindustrie auch für die Pharmaindustrie eine große Bedeutung [41]. Die Verwendung von pflanzlichem Rohmaterial ist teilweise erheblich günstiger als die chemisch hergestellte Substanz [42]. Die weltweit steigende Nachfrage nach hochwertigen pflanzlichen Rohstoffen kann zu einer erheblichen Reduktion vorwiegend wild geernteter Vorkommen führen [43]. Eine Möglichkeit, die natürlichen Bestände zu schützen, wird unter anderem in der Gewebekultur und dem Anbau im großen Stil in Industrieländern gesehen [44].




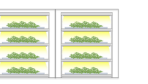
### *Technologischer Wandel*

Die Digitalisierung beeinflusst heute weite Bereiche unseres täglichen Lebens. Digitale Strategien werden weltweit als wichtiger Treiber für eine nachhaltige Entwicklung im Nahrungsmittelsektor angesehen [45 bis 47]. Die zunehmende Integration von Sensoren in landwirtschaftliche und gartenbauliche Prozesse sowie das Internet of Things (IoT) unterstützen die Entwicklung von Smart Farming mittels Big Data, Robotik und künstlicher Intelligenz [48; 49]. Dies ermöglicht eine höhere Transparenz, kontinuierliches Monitoring und darauf basierende Optimierung auf der Ebene der Produktion sowie entlang der gesamten Supply Chain. Dabei nutzen moderne Gewächshaus-Management-Systeme bereits seit Jahren eine Vielzahl an Sensoren, um die Klimaführung, die Nährlösung oder die Bewässerungssteuerung anzupassen und kontinuierlich zu dokumentieren. Sensoren, welche ein dauerhaftes Monitoring des Ressourcenverbrauchs sowie pflanzenphysiologischer Parameter erlauben, sind jedoch in der Praxis immer noch selten zu finden. Zudem ist der Pflanzenbau im Gewächshaus meist mit einem hohen Anteil an manueller Arbeit verbunden, was auch an der hohen Anzahl an Saisonarbeitskräften immer wieder deutlich wird. Bei der Produktion in Gewächshäusern beschränkt sich die Automatisierung meist auf einfache Aufgaben wie Aussaat, Umpflanzen,

Transportieren oder Sortieren [50]. Vollständig autonome Prozesse und intelligente Sensoren sind bis heute die Ausnahme und stellen die Forschung vor allem bei Fruchtgemüse aufgrund der kontinuierlichen Pflegearbeiten, der hohen Variation der Früchte innerhalb einer Kultur, der hohen Empfindlichkeit der Früchte und den variablen Produktionsumgebungen vor erhebliche Herausforderungen [51; 52]. Dennoch wird gerade in der geschützten Pflanzenproduktion ein deutlicher Wandel durch die Fortschritte in Precision Farming sowie datengestützten und intelligenten Systemen erwartet [53].

### **Indoor Vertical Farming als High-Tech Ansatz – ein Betrag zur Lösung**

High-Tech Farmen wie beispielsweise Bioreaktoren zur Algenproduktion, Insektenfarmen zur Eiweiß- oder Tierfutterproduktion und Indoor Vertical Farming zur Produktion von Gemüse und Kräutern oder pflanzlichen Rohstoffen können einen Beitrag zur künftigen Lebensmittel-, Pharma- und Kosmetikindustrie leisten. Indoor Vertical Farming ist dabei ein proaktiver Ansatz, um den Pflanzenbau mit innovativen Entwicklungen in urbanen Regionen zu ermöglichen und einen klimasicheren Pflanzenbau zu erreichen [54; 55]. Die Unabhängigkeit der Indoor Vertical Farm von den natürlichen, lokal verfügbaren Ressourcen wie der Globalstrahlung oder den Klimabedingungen ermöglicht eine standortunabhängige, ganzjährige und auf optimale Wachstumsbedingungen ausgelegte Produktion mit präziser Planbarkeit und sehr hoher Flächennutzungseffizienz (Abb. 4). Durch das geschlossene Bewässerungssystem wird zudem sehr effizient der Ressourcenverbrauch von Wasser um bis zu 99 % reduziert, ein Verzicht auf Pestizide erreicht sowie der Austrag in den Boden konsequent verhindert [28]. Auch erlaubt die Standortunabhängigkeit eine Produktion auf kontaminierten oder versiegelten Bodenflächen, wodurch diese verlorenen Flächen erneut zur Nahrungsmittelproduktion genutzt werden können. Durch eine sinnvolle Integration innerhalb dicht besiedelter städtischer Flächen (z. B. Parkplätzen, Lagerhallen, Dachflächen) oder direkt neben weiterverarbeitender Industrie können neue Supply Chain-Konzepte etabliert und Synergieeffekte (z. B. Energie aus Biomasseabfällen [56]) genutzt werden. Hohe Grundstückspreise in Kombination mit Investitions- und Energiekosten erfordern eine hohe Produktivität und Rentabilität. Die Produktion von Grundnahrungsmitteln zur Ernährungssicherung ist daher sowohl im Gewächshaus als auch in der Indoor Vertical Farm bisher ökonomisch in der Regel nicht tragfähig und es werden vor allem hochwertige Sonderkulturen oder Produkte außerhalb der üblichen saisonalen Verfügbarkeit kultiviert. Das hohe Potential zur Akkumulation an Sekundärmetaboliten und ätherischen Ölen durch biotische und abiotische Stressfaktoren und die ganzjährig homogenen Kulturbedingungen einer Indoor Farm erlauben eine gezielte Qualitätssteuerung, was gegenwärtig vor allem für die Pharmaindustrie, die Lebensmittelindustrie und den Lebensmitteleinzelhandel (LEH) zunehmend von Interesse ist [57]. Mit einem zunehmenden Rückgang an landwirtschaftlich nutzbarer Fläche können klimaunabhängige Kultursysteme aber zunehmend auch für die Produktion von Getreide und Grundnahrungsmitteln interessant werden [58].

		 open field *1	 foil tunnel *1	 greenhouse*2	 indoor farm
<b>climate change</b>	independence	↓	→	↑	↑↑
	year round production	↓	→	↑	↑↑
	planning capability	↓	→	↑	↑↑
	surface use efficiency	↓	↓	→	↑
<b>sustainable consumption of resources</b>	water use efficiency (l / product)	↓	→	↑	↑↑
	pesticide / nitrate discharge	↓	→	↑	↑↑
	energy consumption	↑↑	↑↑	↓	↓↓
	conversion usable area	→	→	↑	↑↑
<b>consumer expectation, retail requirements, supply Chain</b>	quality control	↓	→	↑	↑↑
	yield maximization	↓	→	↑	↑↑
	suitability for staple food*3	↑↑	↑	↓	↓↓
	product safety	↓	→	↑	↑
<b>technological transition</b>	degree of autonomous processes	→	→	↑	↑
	interest in integration	↑	↑	↑↑	↑↑
	potential for autonomous processes	↑	↑	↑	↑↑
<b>barriers</b>	investment / maintenance costs*3	→	→	↓	↓↓
	complexity / know-how*3	→	→	↓	↓↓

\*1 open field production in europe | \*2 greenhouse in northern europe (whole year production) | \*3 as of today

**Bild 4:** Überblick über relevante Parameter im Vergleich zwischen Produktionssystemen

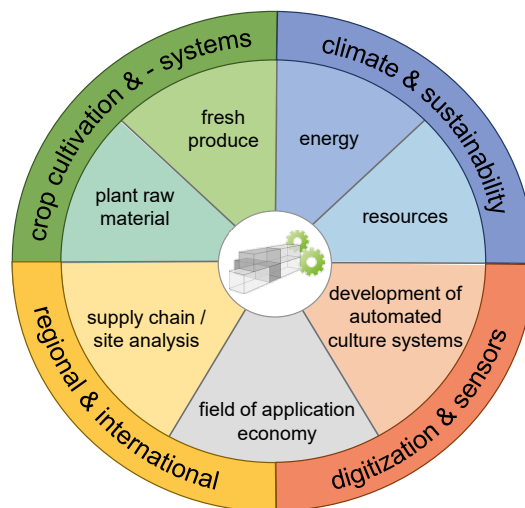
**Figure 4:** Overview of relevant parameters in comparison between production systems

Durch die standardisierten Kulturbedingungen, den technikorientierten Ansatz und industrialisierte Prozesse ist Indoor Vertical Farming besonders gut an die Anforderungen des Einsatzes verschiedener Sensoren angepasst und begünstigt die digitale Entwicklung und Automatisierungsansätze. Aufgrund der hohen Komplexität und des notwendigen Know-Hows zum Betrieb einer Indoor Vertical Farm ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit sowohl in der Forschung als auch im eigentlichen Betrieb notwendig, was je nach Region eine erhebliche Hürde für die Implementierung solcher Systeme darstellen kann [28]. Zudem bleibt eine wichtige Herausforderung, innovative Ansätze für nachhaltige und effiziente Energieversorgungskonzepte zu entwickeln.

### Applied Science Centre for Smart Indoor Farming an der HSWT

Anfang 2020 wurde an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) das erste Applied Science Centre (ASC) mit dem Thema „Smart Indoor Farming“ gegründet [59]. Das ASC for Smart Indoor Farming wird als Plattform dienen, um wichtige Themen rund um das Thema Indoor Farming zu bearbeiten oder Interessenten aus den verschiedenen Themenfeldern zusammenzuführen. Angelehnt an die identifizierten Treiber liegt der Hauptschwerpunkt auf den in **Bild 5** aufgeführten Themen. Unterstützt wird das ASC for Smart Indoor Farming durch den Aufbau eines Forschungsschwerpunktes im Themengebiet Indoor Farming an der HSWT. Der Fokus liegt dabei zunächst auf der Produktion, Extraktion und Weiterverarbeitung pflanzlicher Rohstoffe aus unterschiedlichen Pflanzenorganen.





**Bild 5:** Forschungsthemen im HSWT geförderten Applied Science Centre for Smart Indoor Farming  
**Figure 5:** Research topics of the Applied Science Centre for Smart Indoor Farming funded by the HSWT

Das ASC baut auf Untersuchungen zu verschiedenen Bewässerungs- und Kulturführungssystemen und einem ersten Kulturscreening auf, welche im Rahmen verschiedener Forschungs- und Kooperationsprojekte entstanden sind. Bisher wurden unterschiedliche Pflanzenarten hinsichtlich Kulturführungs- und Bewässerungsstrategien im Rahmen der Inbetriebnahme der Indoor Farm untersucht [60] (**Tabelle 1A**). Weitere Untersuchungen an verschiedenen kleinwüchsigen Pflanzenarten, Kräutern, aber auch Fruchtgemüsearten erfolgen derzeit bezogen auf die Stoffströme, Ressourceneffizienzen, Akkumulation von Wirkstoffen wie ätherischen Ölen und einer Reduktion des elektrischen Gesamtenergieverbrauchs. Durch die Integration der HSWT in das Forschungsprojekt Cubes Circle im Rahmen des Förderschwerpunkts Agrarsysteme der Zukunft (BMBF) werden zudem potentielle Vernetzungen der Stoffströme zwischen weiteren Produktionssystemen für Fische und Insekten sowie die Einbindung in einen urbanen Raum berücksichtigt [61]. Zukünftige Vorhaben schließen die Nutzung alternativer Energieversorgungskonzepte, die Nutzung von IoT gestützten Kamerasystemen sowie den Einsatz pflanzenphysiologischer Monitoringverfahren zur Etablierung von Regelstrategien und der weiteren Optimierung des Kultursystems ein.

Die bisherigen Ergebnisse zu Pak Choi und Majoran (**Tabelle 1B**) bestätigten die in der Literatur aufgeführten Vorteile der Indoor Farm bezüglich Flächeneffizienz und dem Wasserverbrauch, weisen jedoch auch deutlich auf den hohen Energieverbrauch hin [57; 62]. Dabei wurde vor allem bei der Kultur von Tomate im Vergleich mit Pak Choi und Majoran die hohe Bedeutung der zu vermarktenden Pflanzenorgane (Blattmasse oder Frucht) sowie der Unterschied zwischen Frischmasse und Trockenmasse deutlich, welche einen Einfluss auf die Ressourceneffizienz und letztlich die Kosten haben. Vielversprechende Ansätze, den elektrischen Energieverbrauch durch Licht- und Temperaturstrategien zu reduzieren, sind bisher sowohl im Modell als auch in pflanzenbaulichen Versuchen sichtbar und werden in weiteren Versuchen quantifiziert [63].

**Tabelle 1:** Übersicht untersuchter Pflanzenarten und Parameter

**Table 1:** Overview evaluated plants species and parameters

A: Investigations during the installation phase		Mentha spicata var. crispa	Nasturtium officinale	Ocimum basilikum	Lactuca sativa	Phaseolus vulgaris var. nanus	Perilla frutescens var. crispa	Brassica rapa ssp. chinensis	Lycopersicon esculentum	Origanum majorana *	
irrigation system	ebb and flow	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	deep water	X	X		X		X		X		
	NFT/rins			X	X				X		
substrate/ mats	organic	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	inert	X	X		X				X	X	
plant Cultivation	spektrum				X		X	X	X	X	
	DLI							X	X	X	
	surface illumination				X			X	X	X	
	temperature strategies				X			X		X	
	water use							X	X	X	
	beneficial insects use	X	X	X	X		X	X	X	X	
energy use optimication	strategies for illumination							X		X	
	temperature strategies							X		X	
B: Investigations to record the efficiency / optimization								FM	FM	DM	DM
utilization	marketable biomass (%)							n.A.	24	n.A	32
	not marketbale biomass (%)							n.A.	51	n.A	20
	residual (%)							n.A.	25	n.A	48
production process	specific energie use (g kWh <sup>-1</sup> )							n.A.	12,0	0,9	1,6 ± 0,1
	specific water use (g l <sup>-1</sup> )							860,0	142,9	10,6	48,2 ± 11,8
	SUE (kg m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )							21,9	7,9	1,0	1,4 ± 0,2
	EEE (kWh kg <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )							36,7	72,7	967	71 ± 4
physiological growth	ETR <sub>max</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )							n.A.	n.A.	n.A.	46,8 ± 3,0
	LUE (μmol CO <sub>2</sub> μmol <sup>-1</sup> )							0,11 ± 0,01	n.A.	n.A	n.A
	WUE (μmol CO <sub>2</sub> mmol <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O)							13,2 ± 1,2	n.A	n.A	n.A

SUE = surface use efficiency | EEE = elec. energy use efficiency | ETR = elektron transportation rate | LUE = light use efficiency | WUE = water use efficiency

\* Wittmann, S.; Jüttner, I. und Mempel, H.: Indoor Farming Marjoram Production—Quality, Resource Efficiency, and Potential of Application. Agronomy 10 (2020) H. 11

## Ausblick

Trotz der dargestellten Vorteile ist die Skalierbarkeit, Nachhaltigkeit und Kosteneffektivität von Indoor Vertical Farming vor allem durch den hohen Energieverbrauch noch immer unsicher [2]. Der Fokus weiterer Forschung liegt daher auf einer energieeffizienten Produktion pflanzlicher Rohstoffe, welche durch weitere Digitalisierung und Entwicklung die Rentabilität erhöhen soll. Durch interdisziplinäre Vernetzung von Fachgebieten im Themengebiet Indoor Vertical Farming können ein systemorientiertes Denken etabliert und bestehende Strukturen aufgebrochen werden, um geeignete Konzepte und neue Vermarktungsstrukturen zu entwickeln. Um die vor allem in Europa vorherrschende Skepsis gegenüber innovativen Formen der Landwirtschaft, insbesondere der substratlosen Kultur zu verringern [4], eröffnet die Kommunikation des Mehrwerts möglicherweise eine Etablierung neuer spezifischer Label.

## **Literatur**

- [1] Hennig, A.: Bayer und Temasek gründen Startup Unfold zur Entwicklung von bahnbrechenden Innovationen im Vertical Farming. URL – <https://www.media.bayer.de/bay-news/baynews.nsf/id/Bayer-Temasek-gruenden-Startup-Unfold-Entwicklung-bahnbrechenden-Innovationen-Vertical-Farming?>, Zugriff am 13.01.2021.
- [2] Prudent, C.: Mit Agrilution frisch auf den Tisch: Miele steigt ins Zukunftsfeld "Vertical Farming" ein. URL – <https://www.miele.de/de/m/mit-agrilution-frisch-auf-den-tisch-miele-steigt-ins-zukunftsfeld-vertical-farming-ein-5155.htm>, Zugriff am 15.01.2021.
- [3] N.N.: IKEA wants all restaurants to be self-sufficient in herbs and lettuce. URL – <https://www.hortidaily.com/article/9185555/ikea-wants-all-restaurants-to-be-self-sufficient-in-herbs-and-lettuce/>, Zugriff am 13.01.2021.
- [4] Sickinger, D.: Frische Kräuter aus neuen Indoor-Farmen bei Aldi Süd. URL – <https://taspo.de/kategorien/frische-kraeuter-aus-neuen-indoor-farmen-bei-aldi-sued/>, Zugriff am 15.01.2021.
- [5] Arnold, H.: Abu Dhabi 100 Mio. Dollar für Agrartechnologie. URL – <https://www.elektroniknet.de/automation/100-mio-dollar-fuer-agrartechnologie.175883.html>, Zugriff am 13.01.2021.
- [6] N.N.: Europas größte Vertical Farm entsteht in Dänemark. URL – <https://www.lebensmittelzeitung.net/industrie/Indoor-Gewaechshaus-Europas-groesste-Vertical-Farm-entsteht-in-Daenemark-149744?crefresh=1>, Zugriff am 13.01.2021.
- [7] Russell Hotten: The future of food: Why farming is moving indoors. URL – <https://www.bbc.com/news/business-49052317>, Zugriff am 13.01.2021.
- [8] Shahbandeh, M.: Projected vertical farming market worldwide in 2019 and 2025. URL – <https://www.statista.com/statistics/487666/projection-vertical-farming-market-worldwide/>, Zugriff am 13.01.2021.
- [9] Kang, Y.; Khan, S. und Ma, X.: Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security—A review. Progress in natural Science 19 (2009) H. 12, S. 1665-1674.
- [10] Raza, A. et al.: Impact of Climate Change on Crops Adaptation and Strategies to Tackle Its Outcome: A Review. Plants (Basel, Switzerland) 8 (2019) H. 2.
- [11] Vogel, E. und Meyer, R.: Climate Change, Climate Extremes, and Global Food Production—Adaptation in the Agricultural Sector. In: Resilience: Elsevier 2018, S. 31-49.
- [12] Myers, S. S. et al.: Climate change and global food systems: potential impacts on food security and undernutrition. Annual review of public health 38 (2017).
- [13] Zhao, C. et al.: Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. Proceedings of the National Academy of Sciences 114 (2017) H. 35, S. 9326-9331.
- [14] Asseng, S. et al.: Rising temperatures reduce global wheat production. Nature Climate Change 5 (2015) H. 2, S. 143-147.

- [15] Zinyengere, N.; Crespo, O. und Hachigonta, S.: Crop response to climate change in southern Africa: A comprehensive review. *Global and Planetary Change* 111 (2013), S. 118-126.
- [16] Wolfe, D. W. et al.: Unique challenges and opportunities for northeastern US crop production in a changing climate. *Climatic change* 146 (2018) 1-2, S. 231-245.
- [17] Gruda, N.; Bisbis, M. und Tanny, J.: Influence of climate change on protected cultivation: Impacts and sustainable adaptation strategies-A review. *Journal of Cleaner Production* 225 (2019), S. 481-495.
- [18] Webber, H. et al.: Uncertainty in future irrigation water demand and risk of crop failure for maize in Europe. *Environmental Research Letters* 11 (2016) H. 7, S. 74007.
- [19] Traore, B. et al.: Effects of climate variability and climate change on crop production in southern Mali. *European Journal of Agronomy* 49 (2013), S. 115-125.
- [20] Bisbis, M. B.; Gruda, N. und Blanke, M.: Potential impacts of climate change on vegetable production and product quality—A review. *Journal of Cleaner Production* 170 (2018), S. 1602-1620.
- [21] Stocker, T. F. et al.: Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change-Abstract for decision-makers; Changements climatiques 2013. Les éléments scientifiques. Contribution du groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du CLIMAT-Resume a l'intention des décideurs. (2013).
- [22] Snyder, R. L.: Climate change impacts on water use in horticulture. *Horticulturae* 3 (2017) H. 2, S. 27.
- [23] Fedoroff, N. V.: Food in a future of 10 billion. *Agriculture & Food Security* 4 (2015) H. 1, S. 1-10.
- [24] Webb, N. P. et al.: Land degradation and climate change: building climate resilience in agriculture. *Frontiers in Ecology and the Environment* 15 (2017) H. 8, S. 450-459.
- [25] Huang, J. et al.: Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change* 6 (2016) H. 2, S. 166-171.
- [26] Vermeulen, S. J.; Campbell, B. M. und Ingram, J. S. I.: Climate change and food systems. *Annual review of environment and resources* 37 (2012).
- [27] Campbell, B. M. et al.: Reducing risks to food security from climate change. *Global Food Security* 11 (2016), S. 34-43.
- [28] Muller, A. et al.: Can soil-less crop production be a sustainable option for soil conservation and future agriculture? , *Land Use Policy* 69 (2017), S. 102-105.
- [29] Chartzoulakis, K. und Bertaki, M.: Sustainable Water Management in Agriculture under Climate Change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 4 (2015), S. 88-98.
- [30] Rosa, L. et al.: Closing the yield gap while ensuring water sustainability. *Environmental Research Letters* 13 (2018) H. 10, S. 104002.

- [31] Fischer, G. et al.: Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990–2080. *Technological Forecasting and Social Change* 74 (2007) H. 7, S. 1083-1107.
- [32] Nikolaou, G. et al.: Implementing sustainable irrigation in water-scarce regions under the impact of climate change. *Agronomy* 10 (2020) H. 8, S. 1120.
- [33] Bennetzen, E. H.; Smith, P. und Porter, J. R.: Agricultural production and greenhouse gas emissions from world regions—The major trends over 40 years. *Global Environmental Change* 37 (2016), S. 43-55.
- [34] Gregory, P. J. und George, T. S.: Feeding nine billion: the challenge to sustainable crop production. *Journal of experimental botany* 62 (2011) H. 15, S. 5233-5239.
- [35] Nordey, T. et al.: Protected cultivation of vegetable crops in sub-Saharan Africa: limits and prospects for smallholders. A review. *Agronomy for sustainable development* 37 (2017) H. 6, S. 53.
- [36] FAO, F. A.O.: The future of food and agriculture—Trends and challenges. Annual Report (2017).
- [37] Ritchie, H. und Roser, M.: Urbanization. *Our world in data* (2018).
- [38] Eigenbrod, C. und Gruda, N.: Urban vegetable for food security in cities. A review. *Agronomy for sustainable development* 35 (2015) H. 2, S. 483-498.
- [39] Jámbo, A.; Czine, P. und Balogh, P.: The Impact of the Coronavirus on Agriculture: First Evidence Based on Global Newspapers. *Sustainability* 12 (2020) H. 11, S. 4535.
- [40] Henry, R.: Innovations in agriculture and food supply in response to the COVID-19 pandemic. *Molecular plant* 13 (2020) H. 8, S. 1095-1097.
- [41] Siro, I. et al.: Functional food. Product development, marketing and consumer acceptance—A review. *Appetite* 51 (2008) H. 3, S. 456-467.
- [42] Lange, D.: Medicinal and Aromatic Plants: Trade, Production, and Management of Botanical Resources. *Acta Horticulturae* (2004) H. 629, S. 177-197.
- [43] Zschocke, S. et al.: Plant part substitution—a way to conserve endangered medicinal plants? , *Journal of ethnopharmacology* 71 (2000) 1-2, S. 281-292.
- [44] Greenwell, M. und Rahman, P.: Medicinal plants: their use in anticancer treatment. *International journal of pharmaceutical sciences and research* 6 (2015) H. 10, S. 4103.
- [45] Raheem, D.: Digitalisation in a local food system: Emphasis on Finnish Lapland. *Open Agriculture* 5 (2020) H. 1, S. 496-508.
- [46] Raheem, D.; Shishaev, M. und Dikovitsky, V.: Food system digitalization as a means to promote food and nutrition security in the Barents region. *Agriculture* 9 (2019) H. 8, S. 168.
- [47] Fielke, S.; Taylor, B. und Jakku, E.: Digitalisation of agricultural knowledge and advice networks: A state-of-the-art review. *Agricultural systems* 180 (2020), S. 102763.
- [48] Sundmaeker, H. et al.: Internet of food and farm 2020. In: *Digitising the Industry*, Bd. 49: River Publishers 2016, ISBN: 8793379811, S. 129-150.

- [49] Wolfert, S. et al.: Big data in smart farming—a review. *Agricultural systems* 153 (2017), S. 69-80.
- [50] Pekkeriet, E. J. und van Henten, E. J.: Current Developments of High-Tech Robotic and Mechatronic Systems in Horticulture and Challenges for the Future. *Acta Horticulturae* (2011) H. 893, S. 85-94.
- [51] Bac, C. W. et al.: Harvesting robots for high-value crops: State-of-the-art review and challenges ahead. *Journal of Field Robotics* 31 (2014) H. 6, S. 888-911.
- [52] Shamshiri, R. R. et al.: Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. 1934-6344 (2018).
- [53] Shamshiri, R. R. et al.: Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. 1934-6344 (2018).
- [54] Avgoustaki, D. D. und Xydis, G.: Indoor Vertical Farming in the Urban Nexus Context: Business Growth and Resource Savings. *Sustainability* 12 (2020) H. 5, S. 1965.
- [55] Liu, S. und Teng, P.: High-Tech Plant Factories: Challenges and Way Forward. : S. Rajaratnam School of International Studies 2017.
- [56] Al-Kodmany, K.: The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. *Buildings* 8 (2018) H. 2, S. 24.
- [57] Wittmann, S.; Jüttner, I. und Mempel, H.: Indoor Farming Marjoram Production—Quality, Resource Efficiency, and Potential of Application. *Agronomy* 10 (2020) H. 11, S. 1769.
- [58] Asseng, S. et al.: Wheat yield potential in controlled-environment vertical farms. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117 (2020) H. 32, S. 19131-19135.
- [59] HSWT: ASC Smart Indoor Farming. URL – <https://www.hswt.de/forschung/forschungseinrichtungen/asc.html>.
- [60] HSWT: Produktqualität und Ressourceneffizienz bei der Pflanzenproduktion in Indoor-Farming-Systemen. URL – <https://forschung.hswt.de/forschungsprojekt/1251-indoor-farming-konzepte>, Zugriff am 15.01.2021.
- [61] N.N.: Closed urban modular energy- and resource-efficient agricultural systems (CUBES) | Teilprojekt 2: PlantCube. URL – <https://forschung.hswt.de/forschungsprojekt/1108-cubes-teilprojekt-plantcube>.
- [62] Mempel, H.; Jüttner, I. und Wittmann, S.: The potentials of Indoor Farming for plant production. at - Automatisierungstechnik, De Gruyter, accepted (2021).
- [63] HSWT: Sprechende Pflanzen und pulsierende LEDs: Studentin für Präsentation zur Effizienz von Indoor Farmen ausgezeichnet. URL – <https://www.hswt.de/presse/news/article/sprechende-pflanzen-und-pulsierende-leds-studentin-fuer-praesentation-zur-effizienz-von-indoor-farmen.html>.

### **Autorendaten**

Prof. Dr. Heike Mempel ist Professorin für Technik im Gartenbau und Qualitätsmanagement und leitet das Applied Science Centre for Smart Indoor Farming an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf.

M.Sc. Sabine Wittmann ist wissenschaftliche Mitarbeiterin an der HSWT im Team von Prof. Mempel.

M.Sc. Ivonne Jüttner ist wissenschaftliche Mitarbeiterin an der HSWT im Team von Prof. Mempel und Betriebsleiterin im ASC for Smart Indoor Farming.

B.Sc. Marvin Spence ist Mitarbeiter im ASC for Smart Indoor Farming.

### **Bibliografische Angaben / Bibliographic Information**

#### **Wissenschaftliches Review / Scientific Review**

Erfolgreiches Review am 07.02.2021

#### **Empfohlene Zitierweise / Recommended Form of Citation**

Wittmann, Sabine; Jüttner, Ivonne; Spence, Marvin; Mempel, Heike: Indoor Vertical Farming: konsequente Weiterentwicklung des geschützten Anbaus. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2020. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2021. S. 1-15

#### **Zitierfähige URL / Citable URL**

<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202012111306-0>

#### **Link zum Beitrag / Link to Article**

<https://www.jahrbuch-agrartechnik.de/artikelansicht/jahrbuch-2020/chapter/gewaechshaustechnik.html>

Dieser Beitrag wird unter einer CC-BY-NC-ND 4.0 Lizenz veröffentlicht.